

**Обґрунтування механізму взаємодії ліпо- та глікопротеїдів  
житньо-пшеничного борошна з наночастинками харчової добавки  
«Магнетофуд»**

**І. В. Цихановська, В. В. Євлаш, О. В. Александров, Т. А. Лазарєва,  
О. А. Бризицька**

*Встановлено механізм взаємодії наночастинок (НЧ) поліфункціональної харчової добавки «Магнетофуд» з функціональними групами складних білків житньо-пшеничного борошна. В основному НЧ харчової добавки «Магнетофуд» взаємодіють зі складними білками за рахунок координаційних зв'язків. Під впливом НЧ добавки «Магнетофуд» в будові складних білків відбуваються структурні зміни: виникають утворення по типу «кластерів» і електростатичні комплекси біополімеру з НЧ «Магнетофуд».*

*Встановлено механізм впливу НЧ харчової добавки «Магнетофуд» на зв'язок  $H_2O$  ліпо- та глікопротеїдами житньо-пшеничного тіста. Наночастинки (НЧ) «Магнетофуд» модифікують ліпо- та глікопротеїди, змінюють просторову будову, сприяючи посиленню процесів гідратації та водоутримання. Зокрема, під впливом НЧ «Магнетофуд» глікопротеїди структурно змінюються, активуються, набувають додаткові реакційно здатні центри, зокрема гідрофільні. В результаті активовані білкові фрагменти житньо-пшеничного борошна, набрякаючи, обгортаються навколо вуглеводних фрагментів та утворюють стійкі глікопротеїнові комплекси. В ліпопротеїдах, завдяки наявності поляризованих НЧ «Магнетофуд» та «кластерів», а також системі водневих зв'язків між диполями  $H_2O$ , накопичення води спостерігається навколо НЧ «Магнетофуд» та в «кластерах» ланцюга ліпопротеїду. Це підвищує вологоутримуючу здатність (ВУЗ) житньо-пшеничного тіста.*

*Запропоновано механізм взаємодії наночастинок «Магнетофуд» із складними білками і молекулами  $H_2O$  у житньо-пшеничній тістовій системі. Накопичення води навколо НЧ «Магнетофуд» та в «кластерах» ланцюгів ліпо- та глікопротеїдів спостерігається завдяки:*

- наявності поляризованих НЧ «Магнетофуд»;*
- виникненню «кластерів» у матрицях біополімерів;*
- системі водневих зв'язків між диполями  $H_2O$ .*

*Все це сприяє підвищенню ВУЗ житньо-пшеничного тіста.*

*Експериментально встановлено, що харчова добавка «Магнетофуд» проявляє комплексну дію: водоутримуючу, жирутримуючу та стабілізуючу. Що призводить до поліпшення споживчих характеристик хлібобулочної продукції*

*Ключові слова: харчова добавка, білково-вуглеводний комплекс борошна, ліпо- та глікопротеїди, механізм, вологоутримуюча здатність*

## 1. Вступ

На теперішній час хлібопекарський сектор України характеризується скороченням об'ємів виробництва; погіршенням структури, рівня якості і безпеки споживання хлібобулочних виробів, а також конкурентоспроможності на зовнішніх ринках.

На частку неякісної хлібобулочної продукції припадає щорічно близько 20–25 %, так як хлібопродукти найчастіше не відповідають вимогам стандартів якості та санітарним нормам, тому що виробляються з борошна з низькими хлібопекарськими властивостями [1]:

- борошно має низький вміст клейковини;
- борошно має дуже погану якість клейковини – суху, слабку короткорвучуюся, крошковатую, що рветься шарами або надмірно розтягну;
- борошно має аміло- і протеолітичні ферменти зі зниженою або навпаки підвищеною активністю [2].

Слід зазначити, що всі недоліки борошна є результатом неправильного зберігання зерна або його погану якість.

Сьогодні найбільш складним становить знайти борошно необхідної якості, за допомогою якої можна було б хоч трохи поліпшити борошно з не дуже хорошими хлібопекарськими властивостями.

Внаслідок цього хлібопекарські підприємства змушені застосовувати поліпшувачі для підвищення якості борошна і виправлення його недоліків.

Крім того, введення в рецептуру хлібобулочних виробів використовуються поліпшувачі і компоненти різноманітного походження. Їх дія багатогранна:

- підвищення терміну зберігання, харчової цінності та якості хлібобулочної продукції;

- надання лікувальних і профілактичних властивостей;
- вплив на якісний і кількісний склад раціону харчування людини.

Все це дозволяє:

- розширити асортимент продукції, що випускається;
- підвищити якість, і в першу чергу, смакові властивості готових виробів, їх оригінальність і харчову цінність;
- вирішити проблему профілактики і лікування різних захворювань, пов'язаних з дефіцитом тих чи інших речовин [1, 2].

Крім того, з огляду на бажання виробника мати високий прибуток при зниженні витрат на виробництво, актуальним є використання технологічної порошкоподібної сировини і харчових добавок, що мають тривалі терміни зберігання. Тому у хлібопекарських виробництвах все частіше застосовується заміна традиційної сировини на більш дешеву технологічну порошкоподібну сировину і харчові добавки, які можуть підвищувати харчову цінність; збагачувати харчовий продукт функціональними інгредієнтами і знижувати калорійність. Тому важливим питанням є знання та створення функціонально-технологічних властивостей (ФТВ) харчових інгредієнтів. Це дозволяє:

- раціонально використовувати нові види сировини і харчових добавок;

– прогнозувати поведінку порошкоподібної сировини і харчових добавок в тістових системах в процесі технологічної обробки і зберігання готових виробів [3].

Тісто – це складна гідрофільна колоїдна система, що складається з каркаса клейковини, який заповнений і оточений слабо набряклим крохмалем і розчиненими в ньому ліпідами, цукрами і мінеральними речовинами. Встановлено, що ліпіди, вуглеводи і мінеральні елементи знаходяться в клейковині в хімічно зв'язаному стані – як в формі адсорбційних комплексів, так частково і у вигляді сполук (гліколіпідів, ліпо- і глікопротеїдів). А крохмаль і оболонкові частинки утримуються механічно [4].

На стан тістових мас впливають властивості сировини, параметри технологічного процесу. У складі ліпопротеїдів можуть бути нейтральні жири, вільні жирні кислоти, фосфоліпіди. Ліпіди, що входять до складу клейковини, впливають на її властивості. Їх дія пояснюється тим, що ненасичені жирні кислоти, окиснюючись і утворюючи пероксиди і гідропероксиди, сприяють окисненню сульфгідрильних груп  $-SH$ . У результаті утворюються дисульфідні зв'язки  $-S-S-$ , які зміцнюють внутрішньо-молекулярну структуру білка, роблячи її більш щільною. Дисульфідні зв'язки утворюються як всередині однієї молекули білка, так і між різними молекулами клейковинних білків. Певна частина ліпідів залишається не зв'язаною з білками і служить, як би, мастилом між білковими молекулами, надаючи клейковині додаткову еластичність [4].

Вологоутримуюча здатність (ВУЗ) є однією з найважливіших функціонально-технологічних властивостей харчової сировини, харчових добавок та готової продукції. ВУЗ виражається в мономерному утриманні води гідрофільними групами (*адсорбція*). В результаті навколо частинок борошна утворюються гідратні оболонки. При цьому взаємодія води з гідрофільними групами відбувається не тільки на поверхні частинок борошна, а й в середині вільної адсорбційної води. Кількість води, зв'язаної таким шляхом, – близько 30 %. Далі йде, так зване, осмотичне набухання, що відбувається в результаті дифузії молекул води всередину частинок борошна (ЧБ). При цьому проходить послідовне зв'язування ЧБ різної кількості шарів  $H_2O$  за участю водневих зв'язків (*абсорбція*). Набухання протікає зі значним збільшенням об'єму міцел, так як кількість води, пов'язане таким шляхом, становить понад 200 %. Здатність біополімерів (білків, вуглеводів) утримувати воду в харчових продуктах підвищує вихід готових виробів, подовжує термін зберігання і покращує текстуру [4, 5].

При випіканні хліба спостерігаються структурні зміни в білково-вуглеводному комплексі тістових систем:

- відбувається денатурація білків, при цьому виділяється вода, а самі білки ущільнюються, втрачають еластичність, утворюючи каркас хліба;

- волога, що виділяється білками, поглинається крохмалем, який міцно пов'язує її, а сам при цьому клейстеризується, утворюючи сухий на дотик м'якуш;

- полісахариди частково клейстеризуються і гідролітичним шляхом розщеплюються до декстринів.

Також, з плином часу при зберіганні хлібобулочних виробів втрачається волога і «погіршується» структура клейковинного каркасу та клейстеризованого крохмалю – хліб черствіє. З метою стабілізації структури білково-вуглеводного каркасу та супрамолекулярних сольватоасоціатів білково-вуглеводного комплексу борошна можна запропонувати поліфункціональну харчову добавку «Магнетофуд». «Магнетофуд» – ультратонкий порошок оксидів феруму  $\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$  з розміром частинок  $\sim 78$  нм [6–8].

Наночастинки мають специфічні властивості, які визначаються наявністю квантово-механічних ефектів, а саме: якісно нових механічних, магнітних, тепло- і електропровідних, оптичних, хімічних і біологічних властивостей. Наноструктурні частинки  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  (структура зворотної шпінелі) демонструють рекордні магнітні властивості: високий магнітний момент і низьку магнітну проникність, що дозволяє відносити їх до суперпарамагнітних матеріалів [9]. Суперпарамагнітні частинки  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  зберігають магнітні властивості і після припинення дії на них зовнішнього магнітного поля, що є виключно важливою властивістю для їх *in vivo* застосування. Зміна магнітних властивостей наночастинок є проявом зміни будови їх кристалічної решітки. Наночастинки  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  мають більш слабкі магнітні властивості, ніж наночастинки на основі заліза, однак, вони більш стійкі до окиснення [10]. В даний час найбільш широке застосування в біохімії отримали наночастинки  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , що обумовлено їх відносно низькою токсичністю, високою реакційною та каталітичною здатністю і стабільністю магнітних характеристик [11].

НЧ харчової добавки «Магнетофуд» мають високий енергетичний та хімічний потенціал та біоспорідненість до біополімерів, зокрема, білків, вуглеводів. Тому несуть в собі нові функціонально-технологічні властивості, наприклад ВУЗ [7, 12, 13].

Для пояснення механізму ВУЗ наночастинок харчової добавки «Магнетофуд» та механізму взаємодії НЧ «Магнетофуд» з ліпо- та глюкوپротеїдами борошна необхідно зрозуміти природу і силу взаємодії наночастинок «Магнетофуд» з відповідними субстратами та  $\text{H}_2\text{O}$ .

## **2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми**

Аналіз літературних даних [3, 5, 14–33] показує, що для підвищення якості, термінів зберігання і харчової цінності хлібобулочні вироби збагачують різноманітними харчовими добавками-поліпшувачами та функціональними інгредієнтами. Хід технологічних процесів багато в чому визначається ФТВ сировинних компонентів. ВУЗ – важлива функціонально-технологічна властивість харчової сировини, тістових систем та готової продукції. ВУЗ характеризує здатність сировинного компонента зв'язувати і утримувати воду, загущувати харчові системи в процесі технологічної обробки. Тому для раціонального використання нових видів сировинних інгредієнтів і харчових добавок необхідне знання їх ФТВ. І перш за все – водопоглинаючої і вологоутримуючої здатності, так як це дозволяє прогнозувати поведінку порошкоподібної сировини і інших харчових інгредієнтів в харчових системах в процесі технологічної обробки та при зберіганні готових виробів.

Основними компонентами, що зв'язують воду в тісті, є білки та вуглеводи: 82–85 % всієї введеної в тісто води поглинається полісахаридами і білками. Решта води залишається у вільному стані [14].

Сучасний сировинний ринок пропонує для підвищення водопоглинаючої здатності (ВПЗ) борошна та вологоутримуючої здатності (ВУЗ) тіста і готових виробів різноманітні харчові добавки. В технологіях хліба широко використовуються мінеральні сполуки (амонійні солі ортофосфатної кислоти, ортофосфати натрію, калію) [15, 16]. Недоліками цих добавок є недостатня функціональність щодо питомого обсягу, пористості і формостійкості хліба.

Великий інтерес викликають спеціальні ферментні композиції «DSM», що з'явилися на світовому ринку. Призначені для некрохмальних полісахаридів борошна. Мета – підвищення ВУЗ тіста і фактичного виходу хлібобулочної продукції [17,18]. Однак, ферменти «DSM» мають вузьку спрямованість і не проявляють комплексну дію. Також не висвітлюється механізм взаємодії ферментного композиту зі складними білками борошна.

Заслужують на увагу і біологічно активні речовини овочевих [19], фруктових [20] і трав'яних добавок, що сприяють збільшенню ВУЗ тістових систем та хлібобулочних виробів [21]. Недоліками цих добавок є низька функціональність щодо текстури і фізико-хімічних властивостей хліба. І не розглядається механізм вологоутримуючої здатності.

Наразі широке поширення отримали різноманітні харчові добавки, одержані з натуральних інгредієнтів: цитрусові волокна; гідроколоїди рослинного походження, ефіри целюлози [3, 5, 22–24]. *Цитрусові волокна* – джерело корисної для здоров'я клітковини. Зміст харчових волокон в них становить від 88 до 93 %, в тому числі розчинних – близько 20 % [3,5, 22]. Завдяки таким добавкам стало можливим створення низькокалорійних продуктів, що зберігають структурно-механічні та органолептичні характеристики традиційних аналогів. Однак вони не забезпечують достатню пористість м'якушки. *Гідроколоїди*: бананові і яблучні порошки; обліпиховий шрот; гуарова і ксантанова камеді [3, 5, 23, 24]; полідекстроза – полісахарид, що складається з полімерів глюкози з низькою молекулярною вагою [3, 5]. Гідроколоїди використовують для надання бажаної в'язкості або консистенції, а також для стабілізації харчових дисперсних систем (емульсій, суспензій). Багато гідроколоїдів, наприклад, гуарова і ксантанова камеді, відносяться до розчинних харчових волокон. І є фізіологічно функціональними інгредієнтами, які можуть знижувати рівень холестерину в крові, сприяти нормальному функціонуванню кишківника, проявляти пробіотичний ефект. Але їх вплив на технологічні показники тістових напівфабрикатів і готових виробів не значний. Також відсутні моделі взаємодії сполук з ліпо- та глюкпротеїдами борошна.

З метою збагачення хлібобулочних виробів повноцінним білком та підвищення ВПЗ борошна пропонується використовувати натуральні порошкоподібні компоненти. Ці інгредієнти отримують сушінням молочних і яєчних продуктів: йогурту натурального знежиреного, сиру натурального знежиреного, молока знежиреного, яєчного жовтку та ін. [3, 15, 25]. Недоліки – відсутність полі-

функціональності та механізму волого утримуючої здатності; недостатній вихід готової продукції.

Останнім часом в харчових виробництвах для підвищення ВУЗ застосовуються різноманітні функціональні інгредієнти, отримані з продуктів вторинної переробки (шкіри, копита, пір'я [26], субпродукти [27], насіння, висівки [28], сироватка [29] та ін.). Однак, ці біодобавки характеризуються вузькою спрямованістю; не проявляють комплексну дію; не розглянуто механізм взаємодії зі складними білками білково-вуглеводного комплексу.

З метою поліпшення ВУЗ тіста та хліба в харчових технологіях використовуються біодобавки на основі пшениці [30]. Однак вихід і структурно-механічні показники готових виробів не покращуються. Відсутня модель водоутримуючої здатності.

Для підвищення ВПЗ борошна та ВУЗ тіста у хлібопеченні запропоновані також біодобавки різного походження: соя, нут [31]; ензими, мікрородорості та ін. [32]. Недоліком цих добавок є недостатня функціональність щодо питомого об'єму, пористості і формостійкості хліба. Також не розглянуте модель взаємодії з ліпо- та глікопротеїдами.

В хлібопекарському виробництві в останні роки для підвищення ВУЗ борошна та тіста використовують сполуки рослинного походження, що містять феноли [33]. Недоліками цих біодобавок є недостатній вихід і термін зберігання готової продукції.

Аналіз інформаційних джерел [3, 5, 14–33] показує відсутність даних про використання нанопорошкових інгредієнтів у технологіях хліба і механізмів взаємодії наночастинок з ліпо- і глікопротеїдами. Для поліпшення якості, подовження термінів зберігання, створення нових функціонально-технологічних властивостей хлібобулочних виробів може бути запропонована поліфункціональна харчова добавка «Магнетофуд». У харчових системах «Магнетофуд» проявляє водоутримуючу, жирутримуючу, жироемульгуючу та стабілізуючу здатність [6–8, 12, 13].

### **3. Ціль та задачі дослідження**

Метою роботи є обґрунтування механізму взаємодії ліпо- та глікопротеїдів житньо-пшеничного борошна з наночастинками (НЧ) харчової добавки «Магнетофуд» для підвищення водоутримуючої здатності тіста.

Для досягнення мети були поставлені наступні завдання:

- обґрунтувати механізм взаємодії наночастинок (НЧ) харчової добавки «Магнетофуд» з функціональними групами складних білків житньо-пшеничного борошна;
- встановити механізм впливу НЧ харчової добавки «Магнетофуд» на зв'язування води ліпо- та глікопротеїдами житньо-пшеничного тіста;
- обґрунтувати механізм взаємодії наночастинок «Магнетофуд» зі складними білками і молекулами  $H_2O$  у житньо-пшеничній тістовій системі.



#### **4. Матеріали та методи дослідження харчової добавки «Магнетофуд»**

##### **4. 1. Досліджувані матеріали та обладнання, що використовували в експерименті**

Досліджували вплив НЧ поліфункціональної харчової добавки «Магнетофуд» на технологічні властивості, зокрема вологоутримуючу здатність, житньо-пшеничного тіста.

Об'єкт дослідження: технологія житньо-пшеничного хліба.

Предмети досліджень:

– зразок 1 контрольний – житньо-пшеничне борошно згідно з ДСТУ-П 4583:2006. Співвідношення борошна житнього обдирного і пшеничного першого гатунку дорівнює 60:40 згідно з базовою рецептурою житньо-пшеничного хліба «Дарницький» [34];

– зразок 2 – житньо-пшеничне борошно з поліфункціональною харчовою добавкою «Магнетофуд» у кількості 0,10 % до маси борошна у вигляді порошку [ТУ У 10.8-2023017824-001:2018. Добавка харчова на основі оксидів заліза «Магнетофуд»];

– зразок 3 – житньо-пшеничне борошно з поліфункціональною харчовою добавкою «Магнетофуд» у кількості 0,15 % до маси борошна у вигляді порошку;

– зразок 4 – житньо-пшеничне борошно з поліфункціональною харчовою добавкою «Магнетофуд» у кількості 0,20 % до маси борошна у вигляді порошку.

Більш детально досліджувані матеріали, обладнання та методики що використовували в експерименті, описано в роботі [35].

##### **5. Результати досліджень механізму взаємодії харчової добавки «Магнетофуд» з ліпо- та глюкпротеїдами житньо-пшеничного борошна**

Дослідження впливу поліфункціональної харчової добавки «Магнетофуд» на вологоутримуючу здатність (ВУЗ) житньо-пшеничного тіста проводили на модельних системах. Харчову добавку «Магнетофуд» вводили у вигляді порошку при приготуванні дослідних зразків борошна у кількості 0,10 – 0,20% до маси борошна [ТУ У 10.8-2023017824-001:2018].

Властивості тіста і виготовленого з нього хліба залежать від молекулярної структури інгредієнтів та стану води, що міститься в них; співвідношення вологи, що знаходиться у вільному і зв'язаному стані. Для з'ясування механізму впливу добавки «Магнетофуд» на компоненти білково-вуглеводного комплексу житньо-пшеничного тіста, досліджували розчинність, кількість зв'язаної води, ВУЗ у дослідних зразках житньо-пшеничного борошна.

У попередніх дослідженнях [12, 13] показано, що найбільш інтенсивно хімічна та електростатична взаємодія наночастинок (НЧ) «Магнетофуд» з диполями  $H_2O$  та іоногенними групами біополімерів перебігає в кислому середовищі.

Для пояснення збільшення вологоутримуючої здатності (ВУЗ) тіста з житньо-пшеничного борошна з НЧ «Магнетофуд» розглянемо механізми взаємодій, що виникають між НЧ харчової добавки «Магнетофуд»,  $H_2O$  та складними білками тіста.

Наночастинки (НЧ) «Магнетофуд» модифікують ліпо- та глікопротеїди, змінюють просторову будову, сприяючи посиленню процесів гідратації та водоутримання. В основному НЧ харчової добавки «Магнетофуд» взаємодіють зі складними білками за рахунок координаційних зв'язків.

*Білкові речовини борошна* через велику лабільність і здатність вступати в реакції з різними іншими сполуками – *ліпідами* і особливо *вуглеводами* утворюють *ліпопротеїди* і *глікопротеїди*. Білки клейковини зв'язують близько половини всієї кількості ліпідів борошна. Зв'язані з білками клейковини вуглеводи і ліпіди значно впливають на її функціонально-технологічні властивості та технологічні показники тістового напівфабрикату. Наприклад, гліадин може утворювати глікопротеїд – двокомпонентний білок, в якому білкова (пептидна) частина молекули ковалентно зв'язана з однією або декількома групами гетероолігосахариду. В молекулах глікопротеїдів залишки оліго- або полісахаридів ковалентно зв'язані (О-або N-глікозидними зв'язками) з поліпептидними ланцюгами білка. В утворенні О-глікозидного вуглевод-білкового зв'язку беруть участь гідроксиамінокислоти. Відомі комбінації: галактоза (Gal)-гідроксилізін, галактоза (Gal) або арабіноза (Ara)-гідроксипролін, але частіше в вузлі вуглевод-білкового зв'язку знаходяться серин або треонін (рис. 1). Відомо приєднання залишків N-ацетилглюкозаміну (GlcNAc), манози (Man) і галактози до серину; фруктози (Fuc) – до треоніну. Однак, переважна більшість таких глікопротеїдів містить у вузлі вуглевод-білкового зв'язку один і той же дисахаридний фрагмент (так званий Кор або стрижень), який складається із залишків галактози і N-ацетилгалактозаміну (GalNAc) і має будову  $\text{Gal}\beta 1-3 - \text{GalcNAc}\alpha 1$ . Цифри позначають номери атомів С в моносахаридах, що беруть участь в утворенні глікозидних зв'язків, грецькі літери – конфігурацію аномерного атома С Кор, зв'язаного з атомом О гідроксильної групи залишку серину або треоніну. До складу вуглеводних ланцюгів таких глікопротеїдів входять також залишки N-ацетилглюкозаміну, L-фруктози і (або) N-ацетилнейрамінової кислоти (NeuAc).



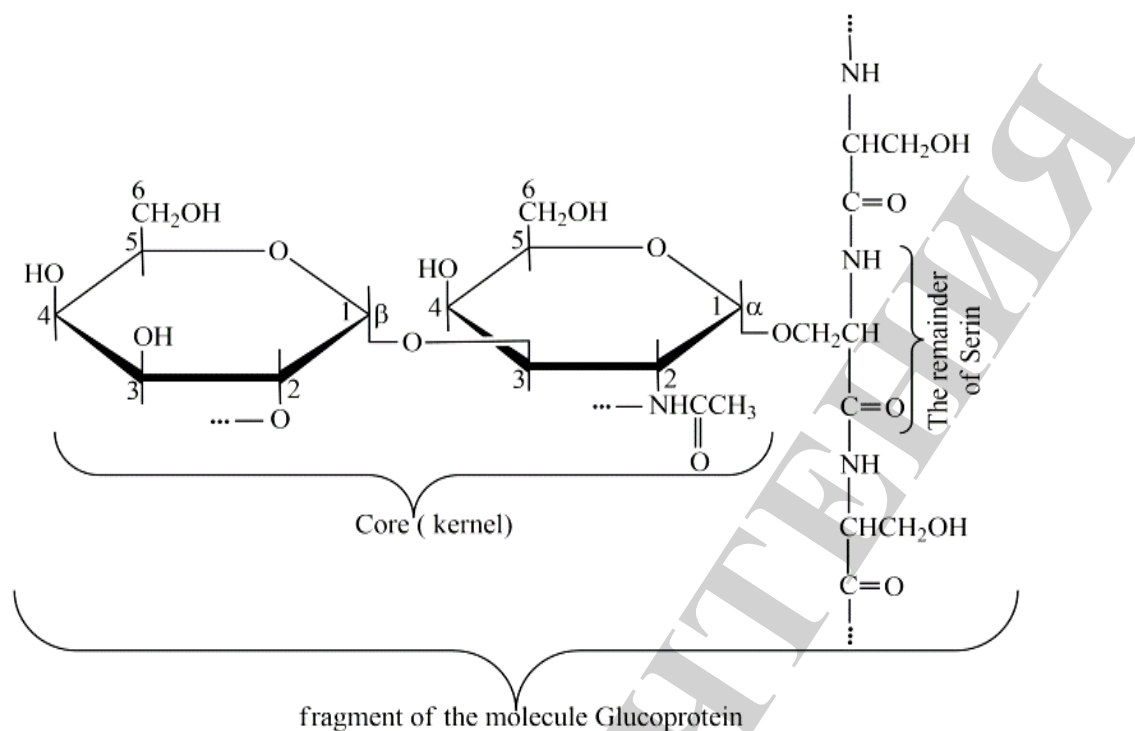


Рис. 1. Структурна формула ланка ланцюга глікопротеїда, що має дисахаридний фрагмент Gal $\beta$ 1–3–GalcNAc $\alpha$ 1 (Кор – який складається із залишків галактози Gal і N-ацетилгалактозаміна GalNAc)

Під впливом НЧ харчової добавки «Магнетофуд» в будові глікопротеїдів відбуваються структурні зміни, представлені на рис. 2.

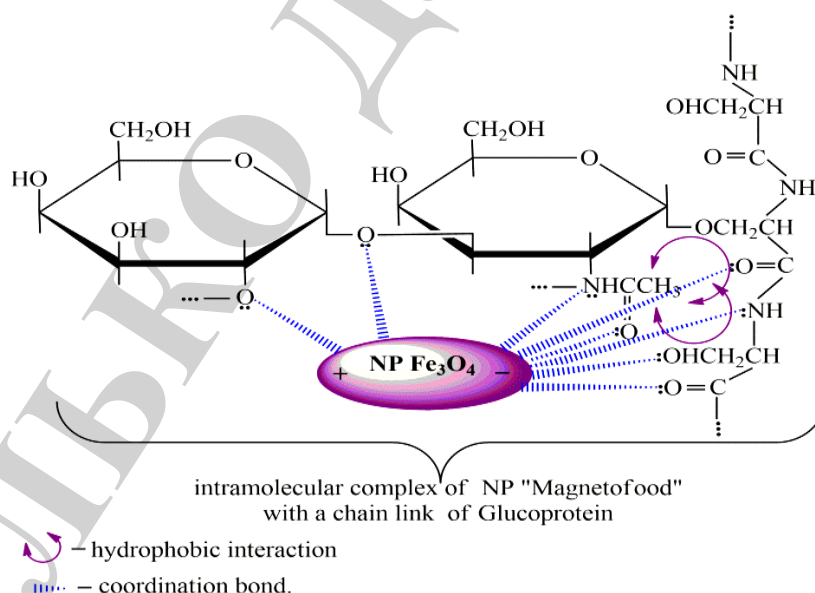


Рис. 2. Самоорганізація у електростатичний комплекс НЧ харчової добавки «Магнетофуд» з ланкою ланцюга глікопротеїду

На рис. 3 наведено утворення сольватоконплексів в «кластерах» ланка ланцюга глікопротеїду.

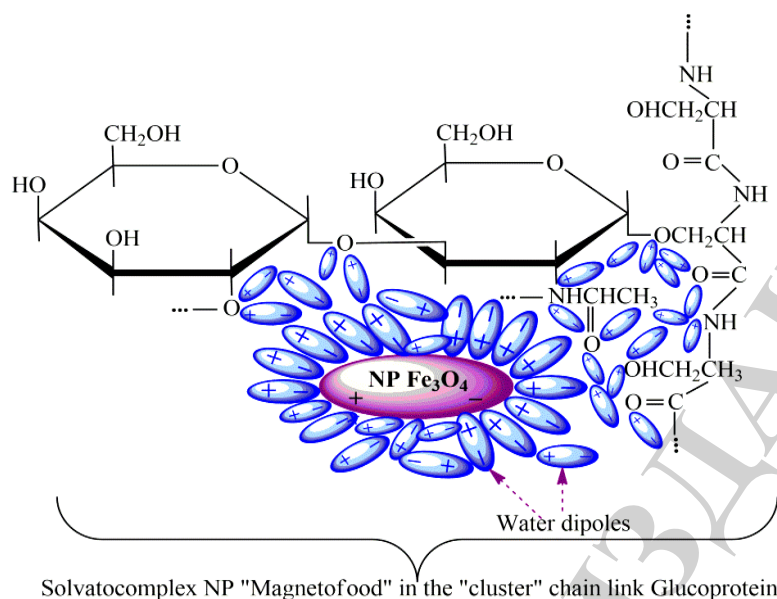


Рис. 3. Сольватоконплеси в «кластерах» ланка ланцюга глюкотеїду

Аналіз даних рис. 3 показує, що НЧ «Магнетофуд» є активними центрами гідрофільності поряд з іонногенними групами дисахариду і білку. НЧ «Магнетофуд» активують утворення сольватасоціатів.

Вміст ліпідів в пшеничному борошні 1,6–2 %. У борошні ліпіди знаходяться як у вільному стані, так і у вигляді конплесів з білками (ліпопротеїди) і вуглеводами (гліколіпіди). Карбоксильні або оксогрупи жирів більш поляризовані та реакційно здатні ніж спиртові групи целюлози та геміцелюлоз. Тому під впливом НЧ «Магнетофуд» ліпопротеїди та гліколіпіди зазнають структурні зміни і при гідратації здатні утворювати більш стійкі структури. На рис. 4 наведено процес самоорганізації НЧ харчової добавки «Магнетофуд» у електростатичний конплес з ліпоротеїдом, який стабілізований електростатичною взаємодією атомів та груп.

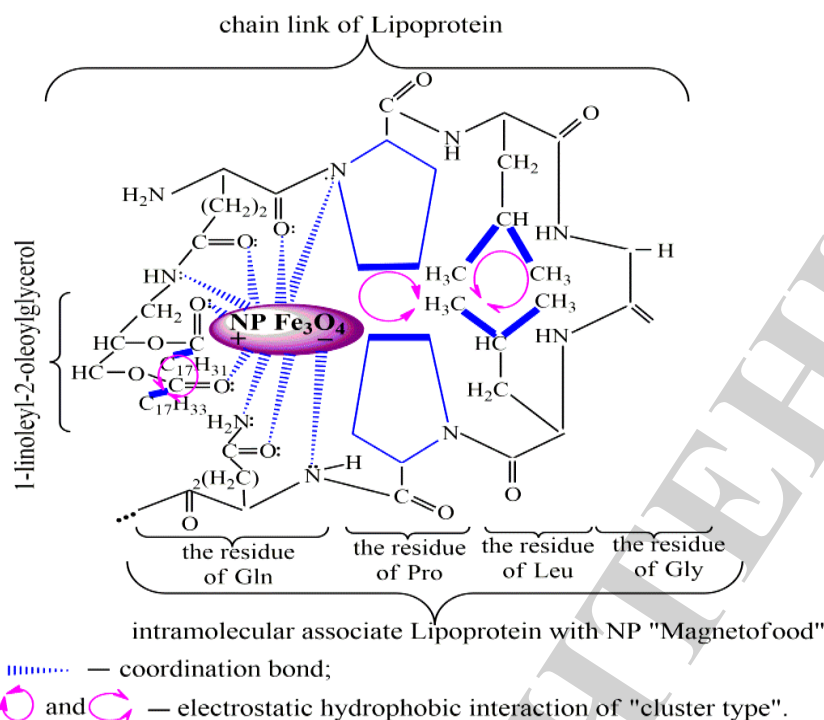


Рис. 4. Утворення електростатичного комплексу НЧ харчової добавки «Магнетофуд» з ланкою ланцюга ліпоротеїду

З даних рис. 4 слід, що НЧ «Магнетофуд» утворюють внутрішньо-молекулярні комплекси за рахунок координаційних зв'язків з атомами Нітрогену і Оксигену залишків глутаміну, проліну та 1-лінолеїл-2-олеїлгліцерину. Також, частково виникають утворення за типом «кластерів», що складають 30 % від структурованої матриці.

На рис. 5 наведено утворення сольватоконплексів в «кластерах» ланка ланцюга ліпопротеїду.

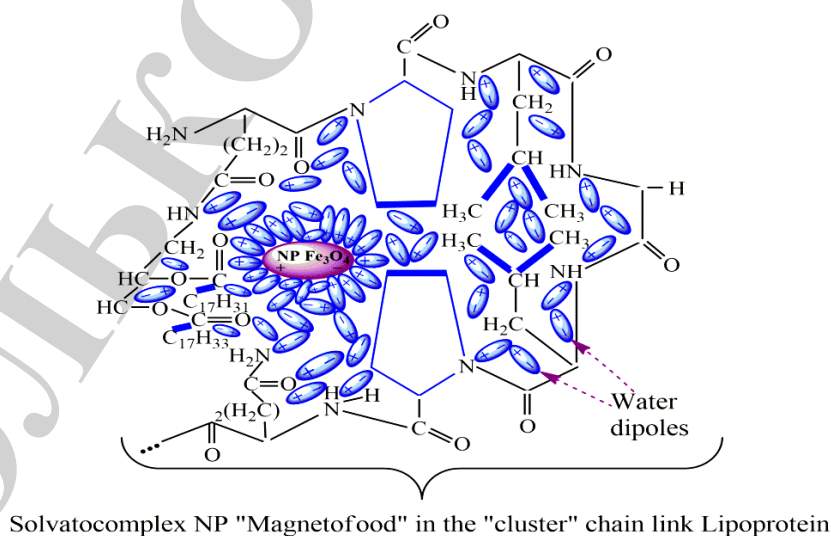


Рис. 5. Сольватоконплекси в «кластерах» ланки ланцюга ліпопротеїду

Аналіз рис. 5 показує, що завдяки наявності поляризованих НЧ «Магнетофуд» та «кластерів», а також системи водневих зв'язків між диполями води, накопичення води спостерігається навколо НЧ «Магнетофуд» та в «кластерах» ланцюга ліпопротеїду, що сприяє підвищенню ВУЗ житньо-пшеничного тіста.

#### **6. Обговорення результатів дослідження впливу харчової добавки «Магнетофуд» на вологоутримуючу здатність житньо-пшеничного тіста**

Аналіз рис. 1, 2 показує, що всередині ланки поліпептидного ланцюга глюкотеїду відбувається координаційна взаємодія НЧ «Магнетофуд» з атомами Нітрогену і Оксигену залишків дисахариду «Кор» та серину. Також здійснюються електростатичні гідрофобні взаємодії аліфатичних бічних ланцюгів залишків серину та метильних груп залишків N-ацетилгалактозаміну. Виникають утворення типу «кластерів» і електростатичні комплекси біополімеру з НЧ «Магнетофуд».

Загально відомо, що ступінь зв'язаності  $H_2O$  зі білком є більшою, ніж з вуглеводами за рахунок вмісту гідрофільних груп  $-NH_2$ ,  $-SH$ , пептидних зв'язків та ін.. Целюлоза та деякі геміцелюлози (зокрема, глюкоманан) мають лінійну структуру. Під впливом НЧ «Магнетофуд» вуглеводи та білки змінюють будову, активуються, набувають додаткові реакційно здатні центри, зокрема гідрофільні. В результаті активовані білкові фрагменти житньо-пшеничного борошна, набрякаючи, обгортаються навколо вуглеводних фрагментів та утворюють стійкі глюкотеїнові комплекси. Це підвищує вологоутримуючу здатність (ВУЗ) житньо-пшеничного тіста.

Аналіз даних рис. 3 показує, що НЧ «Магнетофуд» є активними центрами гідрофільності поряд з іонногенними групами дисахариду і білку. НЧ «Магнетофуд» активують утворення сольватасоціатів. В «кластерах» присутня вільна вода і виникають акваасоціати (волога сорбується за допомогою водневих зв'язків).

З даних рис. 4 слідує, що НЧ «Магнетофуд» утворюють внутрішньо-молекулярні комплекси за рахунок координаційних зв'язків з атомами Нітрогену і Оксигену залишків глутаміну, проліну та 1-лінолеїл-2-олеїлгліцерину. Також виникають утворення по типу «кластерів» за допомогою електростатичних гідрофобних взаємодій аліфатичних бічних ланцюгів залишків лейцину та  $\pi$ - $\pi$ -стекинг взаємодій ароматичних фрагментів залишків проліну.

Аналіз рис. 5 показує, що завдяки наявності поляризованих НЧ «Магнетофуд» та «кластерів», а також системі водневих зв'язків між диполями  $H_2O$ , накопичення води спостерігається навколо НЧ «Магнетофуд» та в «кластерах» ланцюга ліпопротеїду, що сприяє підвищенню ВУЗ житньо-пшеничного тіста.

У «кластерах» може затримуватися і інтерміцеллярна і інтраміцеллярна вода, яка зв'язана водневими, диполь-іонними і диполь-дипольними зв'язками з поляризованими НЧ «Магнетофуд» і гідрофільними групами глюко- та ліпопротеїдів (так як НЧ «Магнетофуд» і частина гідрофільних груп міститься і в «кластерах» і у внутрішніх відділах полімерних макроструктур). І, нарешті, диполі води можуть просто вдаватися до водневих зв'язків, не порушуючи їх міцності. Крім того, бічні розгалуження, що з'явилися у полімерній макрострукту-

рі, сприяють розсуванню головних ланцюгів, не порушуючи їх «зшивання». А це полегшує взаємодію макромолекул біополімерів з диполями води і покращує гідратацію складних білків житньо-пшеничного борошна.

Недоліком даного дослідження є те, що запропонований механізм взаємодії харчової добавки «Магнетофуд» зі ліпо- та глюकोпротеїдами житньо-пшеничного борошна розглянуто лише на одному виді тістової системи – житньо-пшеничної. Також невідомо, як ця добавка буде впливати на технологічні показники тістових мас іншого рецептурного складу (з інших видів і сортів борошна).

Позитивною стороною є те, що запропонований механізм взаємодії добавки «Магнетофуд» зі складними білками може бути використано для вивчення вологоутримуючої здатності білково-вуглеводних комплексів інших харчових систем (м'ясних, молочних та ін.).

## **7. Висновки**

1. Встановлено механізм взаємодії наночастинок (НЧ) харчової добавки «Магнетофуд» з функціональними групами складних білків житньо-пшеничного борошна. В основному НЧ харчової добавки «Магнетофуд» взаємодіють зі складними білками за рахунок координаційних зв'язків. Під впливом НЧ добавки «Магнетофуд» в будові складних білків відбуваються структурні зміни: виникають утворення типу «кластерів» і електростатичні комплекси біополімеру з НЧ «Магнетофуд».

2. Встановлено механізм впливу НЧ харчової добавки «Магнетофуд» на зв'язування  $H_2O$  ліпо- та глюкопротеїдами житньо-пшеничного тіста. НЧ «Магнетофуд» модифікують ліпо- та глюкопротеїди, змінюють просторову будову, сприяючи посиленню процесів гідратації та водоутримання. Іонізовані НЧ «Магнетофуд» активують утворення сольватасоціатів. В «кластерах» складних білків присутня вільна вода і виникають акваасоціати ( $H_2O$  утримується за допомогою водневих зв'язків).

3. Запропоновано механізм взаємодії наночастинок «Магнетофуд» зі складними білками і молекулами  $H_2O$  у житньо-пшеничній тістовій системі. Завдяки наявності поляризованих НЧ «Магнетофуд» та «кластерів», а також системі водневих зв'язків між диполями  $H_2O$ , накопичення води спостерігається навколо НЧ «Магнетофуд» та в «кластерах» ланцюгів ліпо- та глюкопротеїдів, що сприяє підвищенню ВУЗ житньо-пшеничного тіста. У «кластерах» може затримуватись як інтерміцеллярна так і інтраміцеллярна вода, яка зв'язана водневими, диполь-іонними і диполь-дипольними зв'язками з поляризованими НЧ «Магнетофуд» і гідрофільними групами глюко- та ліпопротеїдів. І, нарешті, диполі води можуть просто вдаватися до водневих зв'язків, не порушуючи їх міцності. Крім того, бічні розгалуження, що з'явилися в полімерній макроструктурі, сприяють розсуванню головних ланцюгів, не порушуючи їх «зшивання». А це полегшує взаємодію макромолекул складних білків з диполями  $H_2O$  і покращує гідратацію ліпо- та глюкопротеїдів житньо-пшеничного борошна.

Таким чином, при збагаченні житньо-пшеничного борошна харчовою добавкою «Магнетофуд» зростає його водопоглинаюча та вологоутримуюча здатність.

## Література

1. Обзор рынка хлебобулочных и кондитерских изделий Украины // Хлебопекарское и кондитерское Дело. 2012. № 3, 6.
2. Волкова С. Ф., Золотухина А. О. Состояние и перспективы развития хлебопекарной промышленности Украины // Економіка харчової промисловості. 2012. № 3 (15). С. 51–55.
3. Функционально-технологические свойства порошкообразного сырья и пищевых добавок в производстве кондитерских изделий / Рензяева Т. В., Тубольцева А. С., Понкратова Е. К., Луговая А. В., Казанцева А. В. // Техника и технология пищевых производств. 2014. № 4. С. 43–49.
4. Ауэрман Л. Я. Технология хлебопекарного производства: учебник / под ред. Л. И. Пучковой. СПб.: Профессия, 2003. 253 с.
5. Рензяева Т. В., Позняковский В. М. Вододерживающая способность сырья и пищевых добавок в производстве мучных кондитерских изделий // Хранение и переработка сельхозсырья. 2009. № 8. С. 35–38.
6. The study of nanoparticles of magnetite of the lipid-magnetite suspensions by methods of photometry and electronic microscopy / Alexandrov A., Tsykhanovska I., Gontar T., Kokodiy N., Dotsenko N. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2016. Vol. 4, Issue 11 (82). P. 51–61. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.76105>
7. Design of technology for the rye-wheat bread “Kharkivski rodnichok” with the addition of polyfunctional food additive “Magnetofood” / Tsykhanovska I., Evlash V., Alexandrov A., Lazarieva T., Svidlo K., Gontar T. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2017. Vol. 6, Issue 11 (90). P. 48–58. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.117279>
8. Технология производства и показатели качества пищевой добавки на основе магнетита / Илюха Н. Г., Барсова З. В., Цихановская И. В., Коваленко В. А. // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2010. Т. 6, № 10 (48). С. 32–35. URL: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/5847/5271>
9. Полумбрик М. О. Нанотехнології в харчових продуктах // Харчова промисловість. 2011. № 10. С. 319–322.
10. Sozer N., Kokini J. L. Nanotechnology and its applications in the food sector // Trends in Biotechnology. 2009. Vol. 27, Issue 2. P. 82–89. doi: <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2008.10.010>
11. Баранов Д. А., Губин С. П. Магнитные наночастицы: достижения и проблемы химического синтеза // Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии. 2009. Т. 1, № 1-2. С. 129–145
12. Substantiation of the mechanism of interaction between biopolymers of rye-and-wheat flour and the nanoparticles of the magnetofood food additive in order to improve moisture-retaining capacity of dough / Tsykhanovska I., Evlash V., Alexandrov A., Lazarieva T., Svidlo K., Gontar T. et. al. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2018. Vol. 2, Issue 11 (92). P. 70–80. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.126358>
13. Investigation of the moisture-retaining power of rye-wheat gluten and flour with polyfunctional food supplement “Magnetofood” / Tsykhanovska I., Evlash



V., Alexandrov A., Lazareva T., Svidlo K., Gontar T. et. al. // EUREKA: Life Sciences. 2018. Issue 2. P. 67–76. doi: <http://dx.doi.org/10.21303/2504-5695.2018.00611>

14. Определение связанной воды индикаторным методом в хлебопекарном производстве / Юрчак В. Г., Берзина Н. И., Шмаровоз В. М., Прищепа М. П. // Известия Вузов. Пищевая технология. 1989. № 4. С. 78–80.

15. Булдаков А. Пищевые добавки: справочник. 2-е изд., перераб. и доп. М.: СПб., 2008. 280 с.

16. Матвеева И. В., Велицкая И. Г. Пищевые добавки и хлебопекарные улучшители в производстве хлеба: учебник. Новосибирск: Сиб. унив. изд-во, 1998. 328 с.

17. Maforimbo E., Skurray G. R., Nguyen M. Evaluation of l-ascorbic acid oxidation on SH concentration in soy-wheat composite dough during resting period // LWT – Food Science and Technology. 2007. Vol. 40, Issue 2. P. 338–343. doi: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2005.09.008>

18. Wheat Flour Proteins as Affected by Transglutaminase and Glucose Oxidase / Rosell C. M., Wang J., Aja S., Bean S., Lookhart G. // Cereal Chemistry Journal. 2003. Vol. 80, Issue 1. P. 52–55. doi: <https://doi.org/10.1094/cchem.2003.80.1.52>

19. Чугунова О. В., Пастушкова Е. В. Моделирование органолептических показателей хлеба с растительными добавками // Вестник ЮУрГУ. Серия «Пищевые и биотехнологии». 2015. Т. 3, № 4. С. 80–87. doi: <https://doi.org/10.14529/food150411>

20. Пищевые добавки на основе растительного сырья, применяемые в производстве хлебобулочных и мучных кондитерских изделий / Тамазова С. Ю., Лисовой В. В., Першакова Т. В., Казимирова М. А. // Политематический сетевой электронный научный журнал КубГАУ. 2016. № 122 (08). doi: <https://doi.org/10.21515/1990-4665-122-076>

21. Росляков Ю. Ф., Вершинина О. Л., Гончар В. В. Научные разработки для хлебопекарной и кондитерской отраслей // Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания. 2016. № 6. С. 42–47.

22. Цитрусовые волокна Herbacel AQ Plus – тип N. Спецификации для пищевых добавок и рецептуры. URL: <http://specin.ru/kletchatka/109.htm>

23. Горшунова К. Д., Семенова П. А., Бессонов В. В. Взаимодействие гидроколлоидов и водорастворимых витаминов при конструировании обогащенных пищевых продуктов // Пищевая промышленность. 2012. № 11. С. 46–49.

24. Справочник по гидроколлоидам / под ред. А. А. Кочетковой, Л. А. Сарафановой. СПб.: ГИОРД, 2006. 536 с.

25. Дробот В. И. Использование нетрадиционного сырья в хлебопекарной промышленности. Киев: Урожай, 2008. 152 с.

26. Martins Z. E., Pinho O., Ferreira I. M. P. L. V. O. Food industry by-products used as functional ingredients of bakery products // Trends in Food Science

& Technology. 2017. Vol. 67. P. 106–128. doi: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.07.003>

27. A review: Modified agricultural by-products for the development and fortification of food products and nutraceuticals / Lai W. T., Khong N. M. H., Lim S. S., Hee Y. Y., Sim B. I., Lau K. Y., Lai O. M. // Trends in Food Science & Technology. 2017. Vol. 59. P. 148–160. doi: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2016.11.014>

28. Current trends in the enhancement of antioxidant activity of wheat bread by the addition of plant materials rich in phenolic compounds / Dziki D., Różyło R., Gawlik-Dziki U., Świeca M. // Trends in Food Science & Technology. 2014. Vol. 40, Issue 1. P. 48–61. doi: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2014.07.010>

29. Mango seed: Functional and nutritional properties / Torres-León C., Rojas R., Contreras-Esquivel J. C., Serna-Cock L., Belmares-Cerda R. E., Aguilar C. N. // Trends in Food Science & Technology. 2016. Vol. 55. P. 109–117. doi: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2016.06.009>

30. Bharath Kumar S., Prabhasankar P. Low glycemic index ingredients and modified starches in wheat based food processing: A review // Trends in Food Science & Technology. 2014. Vol. 35, Issue 1. P. 32–41. doi: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2013.10.007>

31. Ngemakwe P. N., Le Roes-Hill M., Jideani V. Advances in gluten-free bread technology // Food Science and Technology International. 2014. Vol. 21, Issue 4. P. 256–276. doi: <https://doi.org/10.1177/1082013214531425>

32. Products of chickpea processing as texture improvers in gluten-free bread / Bird L. G., Pilkington C. L., Saputra A., Serventi L. // Food Science and Technology International. 2017. Vol. 23, Issue 8. P. 690–698. doi: <https://doi.org/10.1177/1082013217717802>

33. Effect of microalgae incorporation on physicochemical and textural properties in wheat bread formulation / García-Segovia P., Pagán-Moreno M. J., Lara I. F., Martínez-Monzó J. // Food Science and Technology International. 2017. Vol. 23, Issue 5. P. 437–447. doi: <https://doi.org/10.1177/1082013217700259>

34. Ершов П. С. Сборник рецептур на хлеб и хлебобулочные изделия. Санкт-Петербург: Профи-информ, 2004. 190 с.

35. Investigation of the water-retaining capacity of the protein-hydrocarbon complex of rye-wheat dough with addition of polyfunctional food supplement “Magnetofood” / Tsykhanovska I., Evlash V., Alexandrov A., Lazareva T., Bryzyska O. // EUREKA: Life Sciences. 2018. Issue 4. P. 63–68. doi: <http://dx.doi.org/10.21303/2504-5695.2018.00668>